

Artículo Científico

Validación de un sistema de aireación automatizado con energía fotovoltaica para el cultivo de gamitana (*Colossoma macropomum*) en la amazonía de Madre de Dios, Perú.

Validation of an Automated Photovoltaic-Powered Aeration System for the Cultivation of Gamitana (Colossoma macropomum) in the Amazon Region of Madre de Dios, Peru.

Gómez-Matos, Homero Josué¹; Morales-Olin, Odalis Maribel².

¹ Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Escuela Profesional de Medicina Veterinaria - Zootecnia; Perú, Puerto Maldonado; <https://orcid.org/0000-0001-8598-5782>; hgomez@unamad.edu.pe.

² Fondo Nacional de Desarrollo Pesquero-Peru; Perú, Lima; <https://orcid.org/0000-0003-1097-5621>; omorales@fondapes.gob.pe.

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v4/n3/381>

Cita: Gómez-Matos, H. J., & Morales-Olin, O. M. (2026). Validación de un sistema de aireación automatizado con energía fotovoltaica para el cultivo de gamitana (*Colossoma macropomum*) en la amazonía de Madre de Dios, Perú. *Innova Science Journal*, 4(3), 763-773. <https://doi.org/10.63618/omd/isi/v4/n3/381>

Recibido: 14/02/2026

Aceptado: 08/07/2026

Publicado: 31/07/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: En la piscicultura amazónica, el oxígeno disuelto es el principal factor limitante de la productividad, y su control resulta especialmente difícil en predios alejados de la red eléctrica, donde la energía convencional es escasa y costosa. El objetivo de este estudio fue validar un sistema de aireación automatizado alimentado con energía fotovoltaica para el cultivo de gamitana (*Colossoma macropomum*) en la localidad de Alegría, Madre de Dios. Se dimensionó e instaló un sistema solar autónomo (cuatro módulos de 150 Wp, banco de baterías de 360 Ah a 24 V e inversor híbrido de 3000 W) que acciona bombas aireadoras mediante un tablero de automatización con dos modos de operación y alternancia programada. El desempeño se evaluó en tres estanques de tierra sembrados a 4 peces/m² durante cuatro meses, comparando tres condiciones: sin aireación (T0, testigo), difusores de aire (T1) y aireadores de gravedad (T2). El oxígeno disuelto promedio fue de 3,79–3,97 ppm en T0, 5,10–5,20 ppm en T1 y 4,21–4,30 ppm en T2; en T0 la concentración descendió hasta ≈ 1,97 ppm en la madrugada, condición de hipoxia que no se presentó con difusores. El tratamiento con difusores alcanzó el mayor peso final (393,5 g), la mayor tasa de crecimiento específico (2,14 %/día) y el mejor factor de conversión alimenticia (1,52), frente a 289,0 g y 1,64 en el testigo. Se concluye que la aireación con difusores accionada por energía fotovoltaica mejora la calidad de agua y el rendimiento productivo, y constituye una alternativa replicable y energéticamente autónoma para la acuicultura en zonas tropicales remotas.

Palabras clave: acuicultura amazónica; oxígeno disuelto; energía fotovoltaica; aireación; *Colossoma macropomum*; Madre de Dios.

Abstract: In Amazonian fish farming, dissolved oxygen is the main factor limiting productivity, and its control is especially difficult on farms far from the power grid, where conventional energy is scarce and expensive. The aim of this study was to validate an automated aeration system powered by solar photovoltaic energy for tambaqui (*Colossoma macropomum*) farming in Alegría, Madre de Dios. A stand-alone solar system was sized and installed (four 150 Wp modules, a 360 Ah/24 V battery bank and a 3000 W hybrid inverter) to drive aeration pumps through an automation panel with two operating modes and programmed alternation. Performance was assessed in three earthen ponds stocked at 4 fish/m² over four months, comparing three conditions: no aeration (T0, control), air diffusers (T1) and gravity aerators (T2). Mean dissolved oxygen was 3.79–3.97 ppm in T0, 5.10–5.20 ppm in T1 and 4.21–4.30 ppm in T2; in T0 it fell to ≈ 1.97 ppm before dawn, a hypoxic condition that did not occur with diffusers. The diffuser treatment reached the highest final weight (393.5 g), the highest specific growth rate (2.14%/day) and the best feed conversion ratio (1.52), versus 289.0 g and 1.64 in the control. Diffuser aeration driven by photovoltaic energy improves water quality and productive performance and represents a replicable, energy-autonomous alternative for aquaculture in remote tropical areas.

Keywords: Amazonian aquaculture; dissolved oxygen; photovoltaic energy; aeration; *Colossoma macropomum*; Madre de Dios.

1. Introducción

La acuicultura es uno de los sistemas de producción de alimentos de mayor crecimiento en el mundo y una vía relevante para la seguridad alimentaria en países en desarrollo (FAO, 2022). En la Amazonía peruana, la actividad se orienta al cultivo de especies nativas —entre ellas la gamitana, *Colossoma macropomum*—, valoradas por su rápido crecimiento, su rusticidad y su aceptación en el mercado regional (Araújo-Lima & Goulding, 1997; Saint-Paul, 1986). En Madre de Dios, la piscicultura crece de la mano de prácticas como el aumento de la densidad de siembra, la aireación mecánica y, más recientemente, el uso de energías renovables.

El oxígeno disuelto es el factor que con mayor frecuencia limita la productividad en cultivos semiintensivos e intensivos: por debajo de un umbral crítico los peces reducen el consumo de alimento, detienen su crecimiento y, en episodios severos de hipoxia, mueren (Boyd & Tucker, 1998; Lawson, 1995). Aunque la gamitana tolera niveles bajos de oxígeno gracias a adaptaciones fisiológicas propias de los peces amazónicos (Val & Almeida-Val, 1995), sostener concentraciones adecuadas mediante aireación mecánica permite intensificar la producción y mejorar la conversión del alimento (Boyd, 1998).

El cuello de botella en la región no es técnico sino energético: muchos predios piscícolas se ubican en zonas sin red eléctrica, donde la única opción convencional es el grupo electrógeno, con su costo de combustible, su logística y su mantenimiento. El precio elevado de la energía incide de manera directa en los gastos operativos de cualquier instalación (Calvopíña-López et al., 2026), por lo que disponer de una fuente autónoma y de bajo costo marginal resulta decisivo. La energía solar fotovoltaica, abundante en la región, ofrece una alternativa limpia y modular para accionar la aireación con independencia de la red (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2003).

En este contexto, el estudio tuvo como objetivo validar un sistema de aireación automatizado alimentado con energía fotovoltaica para el proceso productivo de la gamitana en la localidad de Alegría, Madre de Dios, evaluando su efecto sobre el oxígeno disuelto, el crecimiento y la conversión alimenticia, y analizando su replicabilidad en zonas tropicales con acceso limitado a tecnología y energía. El trabajo se desarrolló en el marco del proyecto PIMEN-11-P-293-056-16.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se ejecutó en el Centro de Producción Acuícola del Sr. Froilán Quispe Ttupa, en el Centro Poblado de Alegría, distrito de Las Piedras, provincia de Tambopata, región Madre de Dios. Se emplearon tres estanques de tierra de entre 306 y 880 m², con entradas y salidas de agua independientes.

2.2. Diseño experimental

Se compararon tres condiciones de aireación, una por estanque, con una densidad de siembra común de 4 peces/m² (Tabla 1). El oxígeno disuelto se registró en dos series de medición por estanque a lo largo del ciclo de 24 horas. Dado que cada tratamiento se aplicó en un único estanque, el diseño constituye una validación a escala de campo

con mediciones repetidas; la ausencia de réplicas verdaderas de estanque se reconoce como limitación y se discute más adelante.

Tabla 1.

Tratamientos de aireación evaluados en el cultivo de gamitana

Tratamiento	Tecnología de aireación	Densidad (peces/m ²)
T0 (testigo)	Sin aireación	4
T1	Difusores de aire	4
T2	Aireadores de gravedad	4

Nota: Las bombas de T1 y T2 fueron accionadas por el sistema fotovoltaico autónomo.

2.3. Diseño y dimensionamiento del sistema fotovoltaico

El sistema se dimensionó para operar de forma autónoma en un predio sin red eléctrica, a partir de la demanda de las bombas aireadoras y del recurso solar local. La energía requerida por día se obtuvo dividiendo la carga diaria entre el factor de rendimiento de la instalación (Ecuación 1), el número de módulos a partir de la energía requerida, las horas de sol pico (HSP) y la potencia de módulo afectada por pérdidas (Ecuación 2), y la capacidad del banco de baterías según la autonomía y la profundidad de descarga admisible (Ecuación 3) (Luque & Hegedus, 2011; SENAMHI, 2003).

$$E_{req} = E_{carga} / \eta$$

$$N_{mod} = E_{req} / (HSP \cdot PR \cdot P_{mod})$$

$$C_{bat} = (E_{req} \cdot D_{aut}) / (V \cdot DoD)$$

La carga conectada correspondió a bombas aireadoras de 80 y 100 W operadas de forma alternada, con un consumo de ≈ 1080 Wh/día. Aplicando un factor de rendimiento de 0,75, la energía requerida fue de ≈ 1440 Wh/día. Con un recurso solar de HSP = 3,76 h (mes más desfavorable según el atlas solar regional), módulos de 150 Wp afectados por un derateo del 70 % y un voltaje de sistema de 24 V, el cálculo arrojó cuatro módulos fotovoltaicos. El banco de baterías se conformó con cuatro unidades de 180 Ah (configuración 2S2P), equivalentes a 360 Ah a 24 V con 50 % de descarga, y el acondicionamiento de potencia se resolvió con un inversor híbrido de 3000 W, sobredimensionado respecto de la carga activa para admitir ampliaciones. La Tabla 2 resume la configuración.

Tabla 2.

Dimensionamiento del sistema de aireación fotovoltaico autónomo

Parámetro	Valor
Carga diaria (bombas aireadoras)	≈ 1080 Wh/día
Factor de rendimiento de instalación	0,75
Energía requerida	≈ 1440 Wh/día
Horas de sol pico (mes desfavorable)	3,76 h
Módulos fotovoltaicos	4 $\times$ 150 Wp (24 V)
Banco de baterías	4 $\times$ 180 Ah (360 Ah a 24 V)
Profundidad de descarga	50 %
Inversor híbrido	3000 W

Autonomía operativa

18 h/día

Nota: Elaborado por los autores

El control se efectuó mediante un tablero de automatización con contactor, temporizadores semanales e interruptor termomagnético, con dos modos de operación. En modo manual el operador energiza las bombas durante el tiempo que estime conveniente; en modo automático, dos temporizadores gobiernan la alternancia de bombas para no sobrecargar el sistema solar, programados según la recomendación técnica para operar a lo largo de 18 horas. La alternancia distribuye el trabajo entre las bombas y estabiliza el consumo, prolongando la vida útil del banco de baterías.

2.4. Preparación de estanques y siembra

Antes de cada ciclo, los estanques se drenaron por completo y se desinfectaron las tuberías de entrada y salida; las zonas no drenables se trataron con cal apagada. Los suelos se secaron al sol durante siete días, hasta el agrietamiento, y se encalaron con el fondo aún húmedo para favorecer la reacción neutralizante. En el llenado se instalaron mallas finas en la entrada y rejillas en la salida para impedir el ingreso de fauna no deseada y la fuga de alevinos, y se aplicaron fertilizantes para estimular la productividad natural. Los alevinos, procedentes del laboratorio de FONDEPES, se transportaron en bolsas con oxígeno, se aclimataron por equilibrio térmico e hídrico y se sembraron en las primeras horas de la mañana a 4 peces/m², tras un periodo de precría de 50 días hasta alcanzar ≈ 30 g de peso promedio.

2.5. Alimentación y muestreo biométrico

Los peces recibieron alimento balanceado distribuido a una distancia de 1 a 3 m del muro, ajustando la ración con los datos mensuales de crecimiento. El requerimiento diario se calculó a partir de la biomasa estimada y de la tasa de alimentación correspondiente a cada etapa (Ecuación 4), y el aprovechamiento del alimento se evaluó con el factor de conversión alimenticia (Ecuación 5).

$$Q_a = B \cdot Ta$$

$$FCA = W_a / B$$

Mensualmente, en las primeras horas del día, se muestreó al azar el 3 % de la población. La longitud total se midió con regla de aluminio (precisión de 0,1 cm) y el peso con balanza; tras la manipulación, los ejemplares recibieron un tratamiento profiláctico con sal común al 3 % durante 15 minutos. La biomasa se estimó como el producto del peso promedio por el número de individuos, y el desempeño se complementó con la tasa de crecimiento específico (Ecuación 6), donde W_t y W_0 son los pesos final e inicial y t el tiempo de cultivo en días.

2.6. Evaluación de la calidad de agua

Los parámetros fisicoquímicos se midieron mensualmente con multiparámetro portátil y disco de Secchi, contrastando los valores con los rangos recomendados para la crianza de peces amazónicos (Tabla 3). El oxígeno disuelto se registró además de forma horaria para caracterizar su variación diurna, dado que los mínimos previos al amanecer son los más comprometidos (Boyd & Tucker, 1998).

Tabla 3.

Parámetros de calidad de agua y rangos recomendados

Parámetro	Nivel recomendado
Oxígeno disuelto (ppm)	> 4
Temperatura (°C)	25 – 30
Conductividad eléctrica (µS/cm)	< 300
pH (unidades)	6,5 – 8,0
Transparencia (m)	0,30 – 0,50

Nota: Elaborado por los autores

2.7. Análisis de datos

Las variables de respuesta —oxígeno disuelto, peso promedio, tasa de crecimiento específico y factor de conversión alimenticia— se resumieron mediante estadística descriptiva (promedios y rangos). Las curvas de oxígeno disuelto diurno y de crecimiento se compararon gráficamente entre tratamientos. Se recomienda, para estudios posteriores con réplicas verdaderas, el análisis de varianza con comparación de medias a un nivel de significación de 0,05.

3. Resultados

3.1. Sistema fotovoltaico implementado

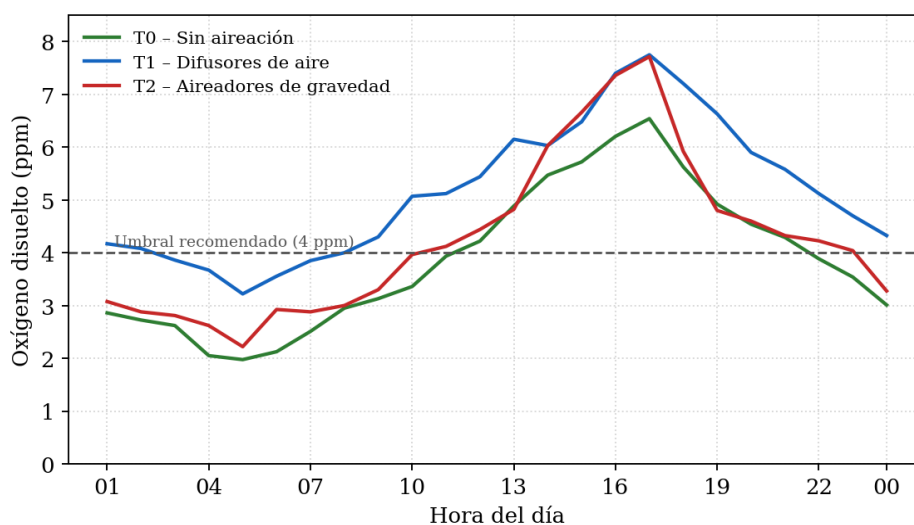
El sistema solar autónomo quedó conformado por cuatro módulos de 150 Wp dispuestos para 24 V, un banco de cuatro baterías de 180 Ah (360 Ah a 24 V) y un inversor híbrido de 3000 W, gobernados por un tablero de automatización con modos manual y automático. El conjunto suministró hasta 18 horas diarias de operación continua de las bombas aireadoras, con respaldo de grupo electrógeno como contingencia, y operó de manera independiente de la red eléctrica durante todo el ciclo de cultivo. El sobredimensionamiento del inversor dejó un margen amplio para ampliar la capacidad de aireación a futuro.

3.2. Variación del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto promedio fue mayor con difusores de aire (T1: 5,10–5,20 ppm), seguido de los aireadores de gravedad (T2: 4,21–4,30 ppm) y del testigo (T0: 3,79–3,97 ppm). El patrón diurno mostró el mínimo característico antes del amanecer: hacia las 05:00 el testigo descendió a $\approx 1,97$ ppm, valor de hipoxia que estresa a los peces, mientras que con difusores el oxígeno se mantuvo en $\approx 3,2$ ppm o más en ese mismo horario (Figura 1). Solo T1 superó de manera consistente el umbral recomendado de 4 ppm durante la mayor parte del día.

Figura 1.

Variación diurna del oxígeno disuelto (promedio) por tratamiento; la línea discontinua indica el umbral recomendado de 4 ppm.



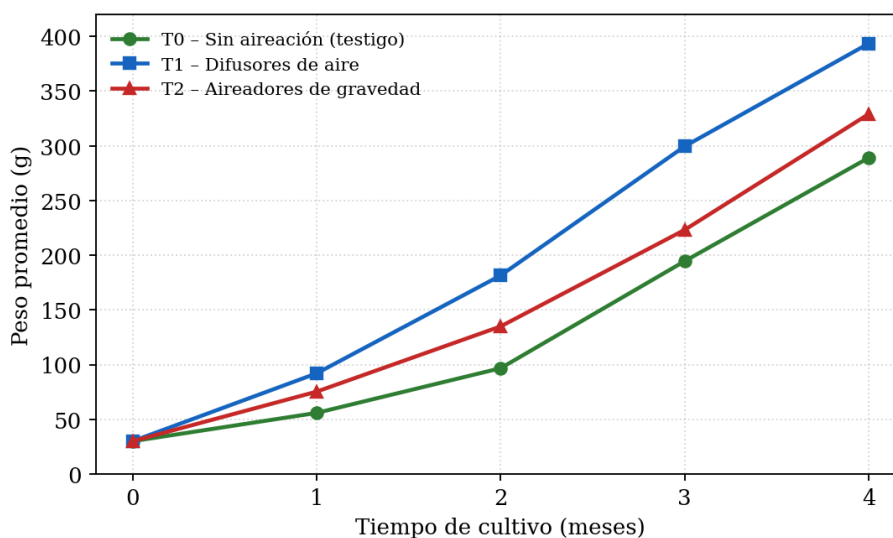
Nota: Elaborado por los autores

3.3. Crecimiento y desempeño productivo

El crecimiento fue superior con difusores de aire durante todo el ciclo (Figura 2). Al cabo de cuatro meses, el peso promedio final fue de 393,5 g en T1, 329,0 g en T2 y 289,0 g en T0, partiendo de ≈ 30 g; ello equivale a ganancias de 363,5, 299,0 y 259,0 g, respectivamente. La tasa de crecimiento específico fue de 2,14 %/día en T1, 2,00 %/día en T2 y 1,89 %/día en T0. El factor de conversión alimenticia acompañó esta tendencia, con el mejor valor (menor) en T1 (1,52), frente a 1,64 en T0 y 1,68 en T2 (Tabla 4).

Figura 2.

*Curva de crecimiento (peso promedio) de *Colossoma macropomum* por tratamiento durante cuatro meses de cultivo.*



Nota: Elaborado por los autores

Tabla 4.

Desempeño productivo de la gamitana por tratamiento al cabo de cuatro meses

Indicador	T0	T1	T2
Peso inicial (g)	30,0	30,0	30,0
Peso final (g)	289,0	393,5	329,0
Ganancia de peso (g)	259,0	363,5	299,0
TCE (%/día)	1,89	2,14	2,00
FCA	1,64	1,52	1,68
OD promedio (ppm)	3,9	5,2	4,3

Nota: TCE: tasa de crecimiento específico; FCA: factor de conversión alimenticia; OD: oxígeno disuelto.

4. Discusión

La dinámica del oxígeno disuelto a lo largo del ciclo diario permite explicar las diferencias productivas observadas entre los tratamientos evaluados. En el estanque testigo, las concentraciones de oxígeno permanecieron de forma persistente por debajo del umbral de 4 ppm recomendado para el cultivo, alcanzando condiciones de hipoxia durante las horas previas al amanecer. Este comportamiento resulta particularmente crítico, ya que las bajas concentraciones de oxígeno reducen el apetito, disminuyen la eficiencia metabólica y limitan el crecimiento de los peces (Boyd & Tucker, 1998; Lawson, 1995). Desde una perspectiva fisiológica, la disponibilidad de oxígeno constituye uno de los principales factores reguladores del desempeño productivo, debido a que la capacidad de captación de las branquias condiciona los procesos metabólicos que demandan energía, entre ellos la ingestión, digestión y asimilación del alimento. En consecuencia, una disminución del oxígeno disuelto restringe el consumo alimenticio y reduce la tasa de crecimiento (Tran-Duy et al., 2008).

Adicionalmente, la exposición prolongada a condiciones hipóxicas induce respuestas fisiológicas de estrés, manifestadas por alteraciones hematológicas y metabólicas, como el incremento de la glucemia y de la metahemoglobina, así como modificaciones en los mecanismos de transporte de oxígeno. Estas respuestas adaptativas implican una redistribución de la energía disponible, priorizando el mantenimiento de la homeostasis sobre los procesos anabólicos y de crecimiento (Affonso et al., 2002). Por ello, aun cuando la gamitana posee mecanismos de adaptación que le permiten tolerar periodos transitorios de baja disponibilidad de oxígeno, dicha capacidad representa un costo fisiológico que limita su potencial productivo.

En contraste, la implementación de sistemas de aireación mediante difusores permitió mantener concentraciones de oxígeno más estables y cercanas a los requerimientos óptimos de la especie, reflejándose en un mayor peso final, una tasa de crecimiento específico superior y una mejor conversión alimenticia. Estos resultados coinciden con lo reportado por diversos autores, quienes señalan que la aireación constituye una herramienta fundamental para intensificar la producción acuícola al eliminar al oxígeno como factor limitante del crecimiento (Boyd, 1998; Lekang, 2013; Timmons & Ebeling, 2013). La superioridad de los difusores frente a otros sistemas de aireación puede explicarse por su mayor eficiencia en la transferencia de oxígeno, ya que la generación

de burbujas finas incrementa el área de contacto entre el aire y el agua y eleva el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($K_L a$), favoreciendo una mayor incorporación del gas al medio acuático (Lawson, 1995; Lekang, 2013).

Aunque la gamitana y otras especies amazónicas presentan adaptaciones morfológicas, hematológicas y metabólicas que les permiten sobrevivir en ambientes con bajas concentraciones de oxígeno (Saint-Paul, 1984; Almeida-Val et al., 1993; Val & Almeida-Val, 1995), la permanencia prolongada en estas condiciones genera un estrés subletal que repercute negativamente en el desempeño zootécnico. En este sentido, mantener las concentraciones de oxígeno por encima de los valores críticos no solo reduce el estrés fisiológico, sino que también favorece la expresión del potencial genético de crecimiento y mejora la eficiencia productiva del cultivo (Araújo-Lima & Goulding, 1997; Baldisserotto & Gomes, 2010).

El menor consumo relativo de alimento registrado en los estanques aireados con difusores puede atribuirse, además, a una mejora integral de la calidad del agua y al incremento de la productividad natural del sistema, que aporta organismos vivos como fuente complementaria de nutrientes. Esta situación adquiere especial relevancia desde el punto de vista económico, considerando que el alimento balanceado representa aproximadamente la mitad de los costos operativos en la piscicultura amazónica, proporción similar a la reportada para otros sistemas de producción acuícola intensiva (Rana et al., 2009). Por tanto, cualquier reducción en el factor de conversión alimenticia tiene un impacto directo sobre la rentabilidad del sistema y refuerza la importancia de implementar estrategias de manejo orientadas al mantenimiento de condiciones adecuadas de oxigenación (FAO, 2024).

Un aspecto relevante del presente estudio es la demostración de que la oxigenación eficiente puede mantenerse mediante sistemas energéticos alternativos, sin depender de la red eléctrica convencional. Esta característica adquiere gran importancia en zonas amazónicas alejadas, donde el acceso a la electricidad suele ser limitado o inexistente y el uso de grupos electrógenos implica elevados costos de operación, mantenimiento y abastecimiento de combustible (Calvopíña-López et al., 2026). En este contexto, los sistemas fotovoltaicos autónomos constituyen una alternativa técnicamente viable y económicamente atractiva, debido a que, una vez realizada la inversión inicial, presentan costos marginales de operación reducidos y aprovechan un recurso energético abundante en la región amazónica (SENAMHI, 2003; Chandel et al., 2015).

La naturaleza modular del sistema desarrollado facilita su replicabilidad en diferentes escalas productivas, ya que su dimensionamiento puede ajustarse de acuerdo con las necesidades específicas de cada unidad de producción, considerando variables como la densidad de cultivo, el número de estanques y la disponibilidad de radiación solar. Asimismo, la posibilidad de incorporar configuraciones híbridas, combinando energía fotovoltaica con grupos electrógenos o sistemas de bombeo directo, amplía las opciones de adaptación tecnológica y favorece su implementación en contextos con diferentes capacidades económicas. La utilización de herramientas de simulación previas a la implementación permite, además, optimizar la asignación de recursos y anticipar escenarios operativos, contribuyendo a una gestión más eficiente del sistema (Méndez-Mantuano et al., 2026).

No obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones del estudio. La aplicación de cada tratamiento en un único estanque impide contar con réplicas verdaderas, por lo que los resultados deben interpretarse como una validación preliminar de campo que requiere ser confirmada mediante diseños experimentales con mayor rigor estadístico. Asimismo, aunque no se registraron eventos de mortalidad durante el periodo de evaluación, resulta necesario incorporar en futuras investigaciones un monitoreo continuo de la supervivencia, de los parámetros de calidad del agua y de los indicadores fisiológicos de los organismos cultivados.

En consecuencia, futuras líneas de investigación deberían orientarse hacia la realización de ensayos a escala comercial con réplicas adecuadas, la evaluación del costo nivelado de la energía solar en comparación con sistemas convencionales, y el análisis de configuraciones híbridas que permitan maximizar la eficiencia técnica y económica del sistema. Del mismo modo, sería pertinente incorporar análisis de sostenibilidad y estudios de impacto ambiental que permitan consolidar la evidencia científica sobre la viabilidad de esta tecnología como alternativa para el desarrollo de una piscicultura amazónica más eficiente, resiliente y sostenible.

5. Conclusiones

La validación en campo demostró que un sistema de aireación automatizado alimentado con energía fotovoltaica permite sostener el oxígeno disuelto en niveles adecuados para el cultivo de gamitana en un predio amazónico sin acceso a la red eléctrica, operando hasta 18 horas diarias con un arreglo de cuatro módulos de 150 Wp, un banco de 360 Ah a 24 V y un inversor híbrido de 3000 W gobernado por un tablero de automatización con alternancia de bombas.

Entre las tecnologías evaluadas, la aireación con difusores de aire fue la más eficaz: mantuvo el oxígeno disuelto entre 5,10 y 5,20 ppm por encima del umbral crítico incluso en la madrugada y alcanzó el mayor peso final (393,5 g), la mayor tasa de crecimiento específico (2,14 %/día) y el mejor factor de conversión alimenticia (1,52), superando tanto a los aireadores de gravedad como al testigo, que registró episodios de hipoxia previos al amanecer.

En conjunto, la tecnología valida una alternativa energéticamente autónoma, de bajo costo marginal y replicable para la acuicultura en zonas tropicales remotas, donde el acceso a la energía convencional es limitado y costoso; su carácter modular permite adaptarla y escalarla a distintas densidades de cultivo y realidades económicas, contribuyendo a la intensificación sostenible de la piscicultura en la Amazonía peruana.

Referencias Bibliográficas

- Affonso, E. G., Polez, V. L. P., Corrêa, C. F., Mazon, A. F., Araújo, M. R. R., Moraes, G., & Rantin, F. T. (2002). Blood parameters and metabolites in the teleost fish *Colossoma macropomum* exposed to sulfide or hypoxia. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 133(3), 375–382. [https://doi.org/10.1016/S1532-0456\(02\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S1532-0456(02)00127-8)
- Almeida-Val, V. M. F., Val, A. L., & Hochachka, P. W. (1993). Hypoxia tolerance in Amazon fishes: Status of an under-explored biological “goldmine”. En P. W.

- Hochachka, P. L. Lutz, T. Sick, M. Rosenthal, & G. van den Thillart (Eds.), *Surviving hypoxia: Mechanisms of control and adaptation* (pp. 435–445). CRC Press.
- Araújo-Lima, C., & Goulding, M. (1997). *So fruitful a fish: Ecology, conservation, and aquaculture of the Amazon's tambaqui*. Columbia University Press.
- Baldisserotto, B., & Gomes, L. C. (Eds.). (2010). *Espécies nativas para piscicultura no Brasil* (2.^a ed.). Editora UFSM.
- Boyd, C. E. (1998). Pond water aeration systems. *Aquacultural Engineering*, 18(1), 9–40. [https://doi.org/10.1016/S0144-8609\(98\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00019-0)
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*. Kluwer Academic Publishers.
- Calvopíña-López, E. J., Calderón-León, M. J., Vasco-Aguilera, A. S., & Burbano-Santamaría, S. P. (2026). Evaluación del consumo eléctrico en el Colegio Nuevo Mundo y su relación con costos mensuales. *Innova Science Journal*, 4(2), 713–721. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v4/n2/307>
- Chandel, S. S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action*. FAO.
- Lawson, T. B. (1995). *Fundamentals of aquacultural engineering*. Chapman & Hall.
- Lekang, O. I. (2013). *Aquaculture engineering* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (2nd ed.). Wiley.
- Méndez-Mantuano, M. O., Huayamave-Rosado, Á. R., & Valenzuela-Cobos, J. D. (2026). Simulación exploratoria de estrategias de optimización hídrica mediante un modelo biofísico de respuesta estomática. *Innova Science Journal*, 4(2), 654–679. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v4/n2/304>
- Rana, K. J., Siriwardena, S., & Hasan, M. R. (2009). *Impact of rising feed ingredient prices on aquafeeds and aquaculture production* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 541). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Saint-Paul, U. (1984). Physiological adaptation to hypoxia of a neotropical characoid fish *Colossoma macropomum* (Serrasalminidae). *Environmental Biology of Fishes*, 11(1), 53–62. <https://doi.org/10.1007/BF00001845>
- Saint-Paul, U. (1986). Potential for aquaculture of South American freshwater fishes: A review. *Aquaculture*, 54(3), 205–240. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(86\)90328-2](https://doi.org/10.1016/0044-8486(86)90328-2)

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. SENAMHI–Ministerio de Energía y Minas.
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013). *Recirculating aquaculture* (3rd ed.). Ithaca Publishing Company.
- Tran-Duy, A., Schrama, J. W., van Dam, A. A., & Verreth, J. A. J. (2008). Effects of oxygen concentration and body weight on maximum feed intake, growth and hematological parameters of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Aquaculture*, 275(1–4), 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.01.024>
- Val, A. L., & Almeida-Val, V. M. F. (1995). *Fishes of the Amazon and their environment: Physiological and biochemical aspects*. Springer-Verlag.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento y el respaldo institucional al proyecto PIMEN-11-P-293-056-16, INNOVATE PERU, ahora denominado PROINNOVATE así como la colaboración del personal técnico del Centro de Producción Acuícola del Sr. Froilán Quispe Ttupa durante la instalación del sistema y el monitoreo del cultivo.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.